

Zahteve za odmevnice in pristop k projektiranju odmevnice akustičnega laboratorija InnoRenew CoE

dr. Rok Prislan

InnoRenew CoE, Livade 6, SI-6310 Izola, Slovenija
E-pošta: rok.prislan@innorenew.eu

Requirements for reverberation chambers and the design approach to the InnoRenew acoustic laboratory chamber

Several important acoustic quantities and parameters are measured in the acoustic environment of a reverberation chamber. In the chamber the presence of the diffuse sound field is assumed, which is difficult to justify due to the absence of well accepted diffuse sound field quantifiers. As a consequence, it is also difficult to define exact design goals for reverberation chambers. In the article some requirements for reverberation chambers are summarized as defined by the standardized measurement procedures, such as for determining the diffuse sound field absorption coefficient of materials (α), sound power of noise sources (L_W) and random-incidence scattering coefficients of surfaces (s). Furthermore, several aspects of the initial acoustic design of the reverberation chamber emerging as part of the acoustic laboratory of InnoRenew CoE are presented.

1 Uvod

V InnoRenew CoE se ukvarjamo z raziskovanjem obnovljivih materialov in trajnostne gradnje ter vpeljavo znanstvenih dognanj v industrijsko prakso. Pri tem se posebej posvečamo inovacijskemu in interdisciplinarnemu proučevanju lesa in njegove uporabe. Pomembno razvojno-raziskovalno področje v InnoRenew CoE je tudi akustika, zato je vzpostavljen akustični laboratorij, ki poleg strokovnega kadra in laboratorijske opreme zajema tudi laboratorijske prostore. V gradnji sta gluha soba in odmevnica, pri čemer so izzivi ob načrtovanju slednje predstavljeni v prispevku.

Odmevnica ni tipski prostor, za izgradnjo katerega bi bila na voljo konkretna navodila ali načrti. Nekatere zahteve za odmevnice so sicer dane v sklopu opisa standardiziranih merilnih postopkov, a se jih le peščica nanaša na fizične lastnosti prostora. Večina zahtev je namreč danih za zvočno polje, ki se vzpostavi v prostoru, zaradi česar so obvezen del akustičnega projektiranja odmevnice tudi napredne računalniške simulacije akustike prostora.

2 Predpostavka difuznega zvočnega polja

V odmevnicah predpostavimo prisotnost difuznega zvočnega polja, ki je v akustičnem slovarju [1] definiran kot: “ide-

alizirano zvočno polje sestavljeno iz neskončno mnogo nekoreliranih ravnih valov, ki imajo enakomerno smerno porazdeljeno intenziteto. Skupna intenziteta je torej nič.”

Takšno polje je homogeno in izotropno, kar je priročna predpostavka v teoretičnih izpeljavah. Ker pa difuznega polja v praksi ni mogoče vzpostaviti, kljub temu, da ga v odmevnicah pričakujemo, gre torej za precej kontroverzen koncept. Pri tem stroka ni poenotena [2, 5] glede definicije difuznega zvočnega polja, njegovega ovrednotenja (karakterizacije) in razumevanja povezave med odbojem zvoka na mejnih površinah in vzpostavljenim zvočnim poljem v prostoru. Kljub prepoznani praktični uporabnosti koncepta difuznega zvočnega polja obstaja torej večja vrzel v njegovem razumevanju, kar povzroča negotovosti tudi pri projektiranju odmevnic [6].

3 Zahteve za odmevnice

Nekatere zahteve za odmevnice in zvočno polje, ki se v njih vzpostavi, so dane v sklopu standardiziranih merilnih postopkov, ki se izvajajo v odmevnicah. Med najbolj relevantnimi področnimi standardi so:

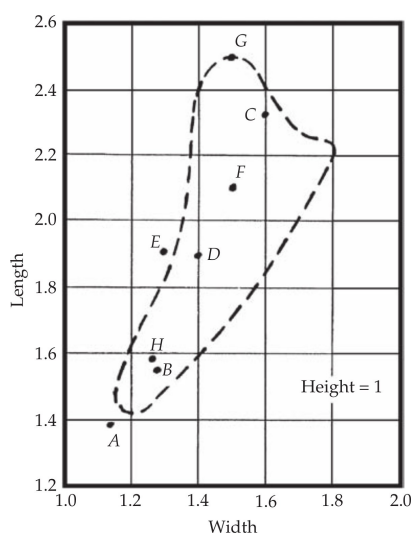
- SIST EN ISO 354:2004 [7], ki obravnava merjenje koeficientov zvočne absorpcije (α). Meritev temelji na vplivu, ki ga ima vnos vzorca materiala tipične velikosti 10-12 m² na odmevni čas v prostoru.
- ISO 17497-1:2004 [8], ki obravnava merjenje koeficientov sipanja na površinah, in sicer ob naključnem vpadu zvočnega vala.
- SIST EN ISO 3741:2010 [9], ki obravnava meritev zvočne moči in ravni zvočne energije virov hrupa. Za nekatere specifične vire hrupa poznamo tudi dodatne merilne standarde, kot npr. ISO 5135:1999 [10] za dušilne in zaporne elemente prezračevalnih sistemov.

Praviloma uporabljamo isto odmevnico za več vrst meritev, kar pomeni, da ločevanje med zahtevami posameznega standarda ni smiselno, saj mora odmevnica zadoščati zahtevam vseh.

3.1 Geometrijske zahteve

Nekatere zahteve so vezane na geometrijo odmevnice:

- Volumen prostora mora presegati $V = 200 \text{ m}^3$, a se za meritve tudi v frekvenčnih pasovih pod 100 Hz priporoča bistveno večje volumne od 200 m^3 . Ker pa večji volumni povečujejo zvočno atenuacijo, ki povzroča pretirano dušenje v območju visokih frekvenc, se le redko gradijo odmevnice volumnov večjih od 300 m^3 .
- Največja razdalja med poljubnima točkama v prostoru mora biti manjša od $1.9 \cdot V^{1/3}$, kar pomeni, da zasnova odmevnice kot izrazito podolgovatega ali ploščatega prostora ni dopustna.
- Če je prostor oblike kvadra, dimenzije stranic ne smejo biti v celoštevilskem razmerju, saj je s tem distribucija prostorskih resonanc neugodna. Zato so dana konkretna priporočila za razmerja stranic, lahko pa uporabimo tudi Boltov pristop [11] (glej sliko 1).
- Za doseganje zadostno homogenega zvočnega polja so dana priporočila glede velikosti in oblike visečih difuzorjev, ki jih v prostor umeščamo po izgradnji.



Slika 1: Optimalno razmerja stranic prostora oblike kvadra (Boltovo območje [11]) označeno kot območje omejeno s prekinjeno črto (vir: [12]).

3.2 Akustične zahteve

Preostale zahteve za odmevnice so dane za njene akustične lastnosti in zvočno polje, ki se v prostoru vzpostavi. Med temi gre naštet:

- Pod dano frekvenčno mejo f_0 , mora biti povprečen koeficient absorpcije α nižji od 0.16, nad njo pa nižji od 0.06. Frekvenčno mejo se izračuna na osnovi volumna prostora

$$f_0 = 2000 \cdot V^{-1/3} \quad [\text{Hz}]. \quad (1)$$

- Največja dopustna absorpcija v prostoru je omejena z volumnom prostora

$$A \leq 0.3 \cdot V^{2/3}. \quad (2)$$

- Ob delovanju zvočnega vira je predpisana dopustna deviacija zvočnega tlaka med merilnimi mesti.
- Zagotoviti moramo nizko raven hrupa ozadja v času meritve, kar dosežemo z visoko zvočno izolativnostjo ločilne konstrukcije. Sestava te je praviloma masivna, in sicer armirano betonska. Poleg tega odmevnica nima direktnega togega stika z okolico, temveč stoji na ustrezno dimenzioniranem izolacijskem sloju.
- Za čas meritve morata biti temperatura in vlaga stabilni in torej znotraj definiranega dopustnega območja. Ker gre najpogosteje tudi za toplotno izredno izolirane prostore, se težave z ohranjanjem temperature in vlage praviloma pojavijo zgolj ob meritvah zvočnih virov, ki oddajajo veliko toplote ali vplivajo na vlago v prostoru.

4 Pristop k projektiranju

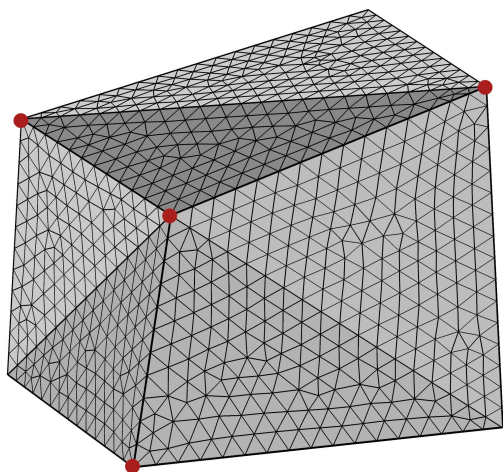
Raziskovalni inštitut InnoRenew CoE gradi nov kompleks inštituta, del katerega je tudi akustični laboratorij. Osnovna omejitev za odmevnico je tako prostor, ki je v objektu na razpolago, in dopustna obremenitev nosilne konstrukcije. S tem je bila že v grobem določena geometrija odmevnice, dodatno pa smo pregledali še priporočila aktualne strokovne literature [13, 14, 6] in primere dobre prakse [15, 16]. Na osnovi tega je bila sprejeta odločitev, da obodne površine odmevnice ne bodo vzporedne, saj lahko to ob vnosu absorpcijskega materiala bistveno vpliva na homogenost zvočnega polja.

Obodne površine bodo grajene iz armiranega betona, opaženje katerih pa prinaša dodatne omejitve. Izredno kompleksne geometrije prostora bi namreč povzročile veliko podražitev izvedbe, zato bo odmevnica grajena iz devetih ravni stranic. Od teh bodo tla in dve steni štirikotne ter med seboj pravokotne, preostanek pa bo iz trikotnih delov, kot je prikazano na sliki 2.

Natančna lega vogalov prostora, ki so na sliki 2 označeni z rdečo, ni določena, temveč je podvržena akustični optimizaciji geometrije. Tako so v času pisanja prispevka v teku računalniške simulacije, na podlagi katerih bo v nadaljevanju definirana končna geometrija odmevnice.

Optimizacija geometrije odmevnice zajema geometrijske metode modeliranja akustike prostora [17, 18], ki jih uporabimo za prepoznavo periodičnih trajektorij. Te so neželene, saj lahko povzročijo persistentno zvočno polje v ravnini, ki znižuje homogenost in izotropnost, ki sta temeljni zahtevi difuznega zvočnega polja.

Optimizacija geometrije prostora zajema tudi uporabo valovnih metod modeliranja akustike prostora [4], in sicer uporabo metode končnih elementov (računalniško orodje COMSOL Multiphysics). Tako se prostor diskretizira na končne volumske elemente, kot je vidno v obliki mreže



Slika 2: 3D model odmevnice: tla in dve steni (v prikazu niso vidne) tvorijo štirikotne stranice, ki so med-seboj pravokotne, preostale stranice pa so trikotne. Lege rdeče označenih vogalov prostora so predmet akustične optimizacije geometrije.

na sliki 2. Simulacije z metodo končnih elementov zajemajo nizko frekvenčno območje, v katerem so relevantni posamezni modalni načini prostora. Pri tem nas zanima distribucija prostorskih resonanc, dodatno pa izvedemo virtualni eksperiment merjenja koeficientov absorpcije skladno z ISO 354 [7].

V sklopu tega v prostor umestimo točkovne zvočne vire in opazovane točke, ki predstavljajo umestitev zvočnika in mikrofонов. Upoštevamo tudi ustrezne robne pogoje, in sicer robni pogoj realne impedance za toge površine in poroznega zvočno vpojnega sloja za vzorčni material. Tako pridobimo frekvenčni odziv prostora in odmevni čas, ki služita kot optimizacijska kriterija.

5 Zaključki

Predstavljeni so bili današnji izzivi akustičnega projektiranja odmevnice, ki izhajajo iz omejenega razumevanja difuznega zvočnega polja in neoprijemljivih zahtev merilnih standardov. Povzete so bile zahteve, ki jih za odmevnice podajajo standardizirani postopki merjenja akustičnih količin in parametrov v odmevnici.

Na primeru odmevnice, ki se projektira v sklopu akustičnega laboratorija InnoRenew CoE, so bile predstavljene računalniške simulacije akustike prostora, na podlagi katerih izvajamo optimizacijo geometrije prostora. Z metodo končnih elementov kot kriterij optimizacije vzamemo distribucijo prostorskih resonanc in vpliv vnosa absorpcijskega materiala na frekvenčni odziv in odmevni čas. Z geometrijskimi metodami preverjamo pojavnost neželenih periodičnih trajektorij. V času pisanja prispevka so v teku računalniške simulacije, na podlagi katerih bo v nadaljevanju definirana končna geometrija odmevnice.

Zahvala

To delo je bilo podprto s sredstvi Okvirnega programa Evropske Unije, Obzorje 2020 (H2020 WIDESPREAD-2-Teaming: #739574, InnoRenew CoE) in Republike Slovenije, Investicijsko financiranje Republike Slovenije in Evropske unije iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- [1] C. Morfey: *The Dictionary of Acoustics*, Academic Press, London (2001)
- [2] T. J. Schultz: *Diffusion in reverberation rooms*, Journal of Sound and Vibration, 16(1), 17 - 28, 1971
- [3] M. Schröder: *Die Statistischen Parameter der Frequenzkurven von grossen Räumen*, Acta Acust. United Ac., 4, 594–600, 1954
- [4] R. Prislan: *Modalni in statistični pristop pri opisu zvočnega polja v prostoru*, Elektrotehniški vestnik, 80(5), 184–188, 2013
- [5] C.-H. Jeong: *Diffuse sound field: challenges and misconceptions*, Proceedings of 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 1015-1021, 2016
- [6] M. Vercammen: *On the Revision of ISO 354, Measurement of the Sound Absorption in the Reverberation Room*, 23rd International Congress on Acoustics, 2019
- [7] *ISO 354:2003: Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*, Geneva, Switzerland
- [8] *ISO 17497-1:2004: Acoustics – Sound-scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*, Geneva, Switzerland
- [9] *ISO 3741:1999: Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Precision methods for reverberation test rooms*, Geneva, Switzerland
- [10] *ISO 5135:1999: Acoustics – Determination of sound power levels of noise from air-terminal devices, air-terminal units, dampers and valves by measurement in a reverberation room*, Geneva, Switzerland
- [11] R. H. Bolt: *Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms*, The Journal of the Acoustical Society of America, 18(1), 130 - 133, 1946
- [12] F. A. Everest, K. C. Pohlmann: *The Master Handbook of Acoustics, 5th*, The McGraw-Hill Companies, Inc (2009)
- [13] M. Nolan, M. Vercammen, C.-H. Jeong in J. Brunskog: *The use of a reference absorber for absorption measurements in a reverberation chamber*, Proceedings of Forum Acusticum, 2014
- [14] M. Nolan, M. Vercammen, C.-H. Jeong: *Effects of different diffuser types on the diffusivity in reverberation chambers*, Proceedings of EuroNoise, 2015
- [15] P. D'Antonio, M. Nolan, E. Fernandez-Grande in C.-H. Jeong: *Design of a New Testing Chamber to Determine the Absorption, Diffusion and Scattering Coefficients*, Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, 2259 - 2266, 2019
- [16] P. D'Antonio, M. Nolan, E. Fernandez-Grande in C.-H. Jeong: *Design of a New Testing Chamber to Measure the Absorption Coefficient Down to 25 Hz*, 4027 - 4034, 2019
- [17] R. Prislan, G. Veble in D. Svenšek: *Ray-trace modeling of acoustic Green's function based on the semiclassical (eikonal) approximation*, The Journal of the Acoustical Society of America, 140, 2695 - 2702, 2016
- [18] R. Prislan: *Osnove geometrijskega modeliranja akustike prostora*, Zbornik šestindvajsete mednarodne elektrotehniške in računalniške konference, 285–288, 2014